

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2010.04.018

## 感潮河段温度与盐度场三维数值模拟研究\*

朱木兰<sup>1</sup>, 韩铜珍<sup>2</sup>, 蔡龙炎<sup>3</sup>

(1. 厦门理工学院水资源环境研究所, 福建厦门 361005, E-mail: zhuml@xmut.edu.cn;

2. 日本水软技术研究所, 日本东京 135-0016;

3. 厦门大学环境科学研究中心&厦门理工学院, 福建厦门 361005)

**摘 要:** 感潮河段受到密度流的影响, 而水体密度不仅受盐度影响而且还受温度影响, 为了做好感潮河段的盐水入侵及温排水扩散情况预测, 该文建立了一个采用正交曲线坐标系、能同时考虑温度与盐度场以及密度流影响的三维水流与水质数学模型。用该模型模拟了天然感潮河段的盐水入侵与温度变化情况, 并与实测结果进行了比较分析, 结果表明水温与盐度沿水深方向分层分布, 且越往上游上下层温差与盐度差越小, 该计算结果与实测值吻合良好。

**关 键 词:** 感潮河段; 盐水入侵; 温排水; 三维数值模拟

中图分类号: TV14

文献标识码: A

## Study on three dimensional numerical simulation for water temperature and salt fields at a tidal river

ZHU Mu-lan<sup>1</sup>, HAN Tong-zhen<sup>2</sup>, CAI Long-yan<sup>3</sup>

(1. Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China;

2. Hydro-soft Technology Institute co. Ltd., Tokyo 135-0016, Japan;

3. Environmental Science Research Centre of Xiamen University & Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Tidal river is generally effected by density flow, while water density is effected by not only salt but also temperature of water. In order to predict the condition of salt water intrusion and the diffusion condition of thermal water

\* 收稿日期: 2010-02-01(2010-04-07 修改稿)

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(2007J0309)和留学回国人员科研启动基金项目

作者简介: 朱木兰(1967-), 女, 福建厦门人, 教授, 博士.

in tidal river, a three-dimension model was developed to calculate water temperature and salt fields for a tidal river. The model was developed by using orthogonal curvilinear coordinates, and with the consideration of density flow. The model was used to simulate the salt water intrusion and water temperature variation in a natural tidal river. The calculation indicated that both temperature and salt of water had layered distributions along depth direction, the results of comparisons between calculations and measurements showed good agreements.

**Key words:** tidal river; salt water intrusion; thermal discharge; three dimensional simulation

## 1 引言

感潮河段与一般河段不同,它存在着高盐度海水沿底层上爬的盐水入侵现象,以及在盐淡水交界面形成密度流的现象。位于感潮河段的众多城市(如上海,张家港),随着经济的快速发展,生活与工农业用水的需求量日益增多,而这些城市的供水水质不可避免地会遭受盐水入侵的影响。为了避免咸取淡,做好盐水入侵预报与防御措施是很重要的。此外,随着我国快速的经济的发展,各行各业对电力的需求日益增大,火、核电厂的数目也日益增多,其中一些电厂(如南京的马渡电厂)就位于淡水与海水相互作用的感潮河段地区。位于感潮河段的电厂,若采用表排深取的取排水口工程布置,则由底部取到的高盐度海水经冷凝器循环后温排水的密度就会有所增加,这就减弱了热水的浮力效应。受密度增加的影响,温排水有可能沉至受纳水体的中层或下层,因此就增加了电厂取水口选择的难度。

由于水的密度受盐度和水温的双重影响,而密度又会反过来影响温度场与盐度场,因此要做好盐水入侵预报,需考虑水温影响(特别在夏季和冬季,海水与河水的温差往往较大)。同样,要做好感潮河段温排水扩散情况预测,亦需考虑盐水入侵影响。所以有必要建立一个能同时考虑水温与盐度以及密度流影响的三维水流与水质数学模型,以模拟预测水温与盐度在平面与水深方向的三维分布情况,从而为感潮河段盐水入侵防御措施的制定,以及电厂取排水工程的布置和环境评价提供可靠的依据。

目前虽然存在不少有关盐水入侵与温排水数值模拟的研究,但仍存在如下一些不足之处:(1)现有研究一般讨论盐水入侵问题时仅进行盐度场模拟计算,讨论温排水问题时仅进行温度场模拟计算。如马钢峰等<sup>[1]</sup>针对长江口,姜恒志等<sup>[2-3]</sup>针对瓯江口进行盐度场数值模拟研究,汪一航等<sup>[4]</sup>针对庄河电厂温排水在附近海域扩散情况进行的温度场

数值模拟研究。而根据感潮河段的特性,同时考虑温度场与盐度场相互影响的数值模拟研究还比较缺乏。(2)现有三维数值模拟研究主要集中于河口与海域,而对于感潮河段的研究目前仍大多停留在沿垂向积分的平面二维模型上,如,张细兵等<sup>[5]</sup>采用有限元算法进行平面二维温排水数学模拟,杨芳丽等<sup>[6]</sup>采用有限体积法及 SIMPLE 算法离散求解方程,建立了基于非正交曲线坐标系下的平面二维温排水数学模型。但二维计算是无法考虑盐水入侵所造成的淡盐水垂向分层现象,这不仅影响了温排水的模拟精度,而且难以以为表排深取的取排水口工程布置提供设计依据。

本文针对感潮河段在盐水入侵与温排水模拟计算方面现有模型的不足之处,采用正交曲线坐标系,建立了一个能同时考虑温度与盐度以及密度流影响的三维水流与水质数学模型,并应用该模型模拟计算了某感潮河段的盐水入侵与水温变化情况,还与该河段上具有温度与盐度垂向观测资料的2个观测点的实测结果进行了比较分析。

## 2 三维水流与水质数学模型

### 2.1 水流计算

为了能很好地处理河流蜿蜒曲折的边界条件,本模型采用了平面为曲线坐标,垂向为直线坐标(如 $z$ 坐标或 $\sigma$ 坐标 $\delta$ )的正交曲线坐标系 $(\xi, \eta, \zeta)$ 。根据 Rouse<sup>[7]</sup>所建立的一般正交坐标系(general orthogonal coordinates)下的连续方程与 Navier-Stokes 方程,可轻易推导出在正交曲线坐标系 $(\xi, \eta, \zeta)$ 中的 $\zeta$ 为垂向直线坐标条件下,如下的三维水流控制方程组,其中式(1)为连续方程,式(2)、(3)和(4)分别为 $\xi$ 、 $\eta$ 和 $\zeta$ 方向的运动方程式:

$$\frac{\partial}{\partial \xi}(h_2 h_3 u) + \frac{\partial}{\partial \eta}(h_1 h_3 v) + \frac{\partial}{\partial \zeta}(h_1 h_2 w) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 u^2) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 uv) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 uw) - \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 \tau^{(11)}) - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 \tau^{(12)}) - \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 \tau^{(13)}) \right] + \\ \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} (vu - \tau^{(21)}) - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} (wv - \tau^{(22)}) + \\ \frac{1}{h_1 h_3} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} (wu - \tau^{(31)}) = f v - \frac{1}{h_1} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \xi} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 vu) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 vv) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 vw) - \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 \tau^{(21)}) - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 \tau^{(22)}) - \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 \tau^{(23)}) \right] - \\ \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} (uu - \tau^{(11)}) + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} (uv - \tau^{(12)}) + \\ \frac{1}{h_2 h_3} \frac{\partial h_2}{\partial \zeta} (wv - \tau^{(32)}) = f u - \frac{1}{h_2} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \eta} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 wu) + \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 wv) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 ww) - \frac{\partial}{\partial \xi} (h_2 h_3 \tau^{(31)}) - \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (h_1 h_3 \tau^{(32)}) - \frac{\partial}{\partial \zeta} (h_1 h_2 \tau^{(33)}) \right] - \\ \frac{1}{h_1 h_3} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} (uu - \tau^{(11)}) - \frac{1}{h_2 h_3} \frac{\partial h_2}{\partial \zeta} (wv - \tau^{(22)}) = \\ -g - \frac{1}{h_3} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \zeta} \quad (4) \end{aligned}$$

式中:  $u, v, w$  分别为  $\xi, \eta, \zeta$  方向的流速;  $h_1, h_2, h_3$  为反映计算网格大小的度量系数 (metric coefficients), 即  $h_1 \partial \xi, h_2 \partial \eta, h_3 \partial \zeta$  代表物理空间中计算网格在  $\xi, \eta, \zeta$  3 个方向的长度;  $\tau^{(ij)}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 为雷诺应力, 其定义如式(5)~(10)所示;  $f$  为柯氏系数;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水的密度, 是水温与盐分浓度的函数, 本文根据 Kundsen 式<sup>[8]</sup>进行计算; 此外, 式中的  $1/h_1 h_2 \times \partial h_1 / \partial \eta$  和  $1/h_1 h_2 \times \partial h_2 / \partial \xi$  其物理意义为物理空间中  $(\xi, \eta)$  平面中  $\xi$ -line 的曲率与  $\eta$ -line 的曲率; 而  $1/h_1 h_3 \times \partial h_1 / \partial \zeta$  则为  $(\xi, \zeta)$  平面中  $\xi$ -line 的曲率;  $1/h_2 h_3 \times \partial h_2 / \partial \zeta$  为  $(\eta, \zeta)$  平面中  $\eta$ -line 的曲率。

从式(2)~(4)可见, 与  $(x, y, z)$  坐标系相比, 正交曲线坐标系下的运动方程式除了时间变化项、对流项、扩散项、压力梯度项、外力作用项之外, 由于  $(\xi, \eta)$  平面坐标线是曲线, 运动方程式中多出了由平面坐标线曲率所产生的离心力项 (如  $1/h_1 h_2 \times \partial h_1 / \partial \eta \times (uu)$  等), 以及柯氏力项 (如  $1/h_1 h_2 \times \partial h_1 / \partial \eta \times (vu)$  等)。此外, 由于  $\zeta$  是直线坐标, 曲率为 0, 故上述水流控制方程组中不存在由  $\zeta$ -line 的曲率所产生的离心力项或柯氏力项。雷诺应力的定义是:

$$\tau^{(11)} = 2\nu_T \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} u \right)$$

(5)

$$\tau^{(12)} = \tau^{(21)} =$$

$$\nu_T \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{1}{h_2} \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} u - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_2}{\partial \xi} v \right) \quad (6)$$

$$\tau^{(13)} = \tau^{(31)} =$$

$$\nu_{Tz} \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial w}{\partial \xi} + \frac{1}{h_3} \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} u \right) \quad (7)$$

$$\tau^{(22)} = 2\nu_T \left( \frac{1}{h_2} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{1}{h_1 h_2} \frac{\partial h_1}{\partial \eta} v \right) \quad (8)$$

$$\tau^{(23)} = \tau^{(32)} =$$

$$v_{Tz} \left\{ \frac{1}{h_2} \frac{\partial w}{\partial \eta} + \frac{1}{h_3} \frac{\partial v}{\partial \zeta} - \frac{1}{h_2 h_3} \frac{\partial h_2}{\partial \zeta} v \right\} \quad (9)$$

$$\tau^{(33)} = 2v_{Tz} \left( \frac{1}{h_3} \frac{\partial w}{\partial \zeta} + \frac{1}{h_1 h_3} \frac{\partial h_1}{\partial \zeta} w + \frac{1}{h_2 h_3} \frac{\partial h_2}{\partial \zeta} w \right) \quad (10)$$

式中:  $v_T$ ,  $v_{Tz}$  分别为水平和铅直方向的紊动黏性系数, 由于分子黏性系数与紊动黏性系数相比很小, 这里忽略不计。

## 2.2 水质计算

在正交曲线坐标系  $(\xi, \eta, \zeta)$  且  $\zeta$  为垂向直线坐标的条件下, 水温  $T$  与物质浓度  $C$  (如盐度, 浊度等) 的方程式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial(h_2 h_3 u T)}{\partial \xi} + \frac{\partial(h_1 h_3 v T)}{\partial \eta} + \right. \\ \left. \frac{\partial(h_1 h_2 w T)}{\partial \zeta} \right] = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ h_2 h_3 (\overline{-u'T'}) \right] + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ h_1 h_3 (\overline{-v'T'}) \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ h_1 h_2 (\overline{-w'T'}) \right] \right\} + H_T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \overline{-u'T'} = D_\xi \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right), \quad \overline{-v'T'} = D_\eta \left( \frac{1}{h_2} \frac{\partial T}{\partial \eta} \right),$$

$$\overline{-w'T'} = D_\zeta \left( \frac{1}{h_3} \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right)$$

$D_\xi, D_\eta, D_\zeta$  分别为  $\xi, \eta, \zeta$  三个方向的扩散系数;  $H_T$  为温度生成项, 该项取决于引起水温变化的热流束  $\phi$ , 而  $\phi = \phi_s - (\phi_{ra} + \phi_{e+c})$ , 其中  $\phi_s$  为日辐射量,  $\phi_{ra}$  为有效长波反辐射量, 它与气温, 云量, 水面温度有关,  $\phi_{e+c}$  为蒸发与热传导所致热损失量, 它与相对湿度, 风速有关。本文分别采用 Harleman<sup>[9]</sup>, Swinbank 和 Rohwer<sup>[10]</sup> 的式子来计算  $\phi_s$ ,  $\phi_{ra}$  和  $\phi_{e+c}$ :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[ \frac{\partial(h_2 h_3 u C)}{\partial \xi} + \frac{\partial(h_1 h_3 v C)}{\partial \eta} + \right.$$

$$\left. \frac{\partial(h_1 h_2 w C)}{\partial \zeta} \right] = \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ h_2 h_3 (\overline{-u'C'}) \right] + \right.$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ h_1 h_3 (\overline{-v'C'}) \right] + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[ h_1 h_2 (\overline{-w'C'}) \right] \right\} +$$

$$S_f + S_g \quad (12)$$

$$\text{式中: } \overline{-u'C'} = D_\xi \left( \frac{1}{h_1} \frac{\partial C}{\partial \xi} \right), \quad \overline{-v'C'} = D_\eta \left( \frac{1}{h_2} \frac{\partial C}{\partial \eta} \right),$$

$$\overline{-w'C'} = D_\zeta \left( \frac{1}{h_3} \frac{\partial C}{\partial \zeta} \right)$$

$S_f$  为物质沉降项;  $S_g$  为物质生成项。这里所计算的物质是盐分。物质沉降项  $S_f$  与物质生成项  $S_g$  分别为 0。

## 2.3 计算方法

为了简便, 假定  $w$  很小,  $\zeta$  的运动方程式(4)中有关  $w$  的计算项可忽略不计 (即计算中采用了静水压强), 从而式(4)可简化成

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \left( \frac{1}{h_3} \frac{\partial P}{\partial \zeta} \right) \quad (13)$$

为了避免产生数值振荡, 在计算中采用了交错网格<sup>[11]</sup>。具体计算方法如下: 首先对水流的运动方程式(3)和(4)中的对流项采用迎风差分, 对其他项采用中心差分进行离散<sup>[12]</sup>, 获得各计算格子点上的  $u$  与水位  $\zeta$ ,  $v$  与水位  $\zeta$  的关系式, 对这些关系式沿水深方向进行积分, 可获得水深平均流速  $\bar{u}, \bar{v}$  与水位  $\zeta$  的关系。另一方面, 对连续方程式(1)沿水深方向进行积分, 可获得水深平均流速  $\bar{u}, \bar{v}$  与水位  $\zeta$  的方程式, 将上述水深平均流速  $\bar{u}, \bar{v}$  与水位的关系式代入沿水深方向积分后的连续方程式, 可获得关于水位  $\zeta$  的代数方程式。采用 TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm) 求解该代数方程式, 可求得水位  $\zeta$ 。采用新求得的水位值代入上述离散后的运动方程式(3)和(4), 并采用 TDMA 方法求解该些代数方程式, 可获得流速  $u$  与  $v$ 。将所求得的流速  $u$  与  $v$  代入连续方程式, 可求得流速  $w$ 。最后, 将所求得的流速值 ( $u, v, w$ ) 代入水温与盐分浓度的离散方程式中, 采用 TDMA 方法分别对这两个离散方程式进行求解, 便可获得水温与盐分浓度, 将水温与盐度值代入 Kundsen 式计算出各点的水的密度  $\rho$ , 然后进入下一个时间段  $\Delta t$  的循环计算。

3 模型的验证

首先,采用某感潮河段在自然条件下的水温实测数据与盐水入侵实测数据来验证所构建的数学模型进行感潮河段温度与盐度场三维数值模拟的可行性。温排水条件下的模型验证有待今后进一步开展。

具体计算对象为某感潮河段从河口至不受潮位变动影响的上游 25Km 处,其河道宽度约为 150m。计算网格在平面上为流向的 398×宽度的 10 分割,在水深方向上为 15 层分割,其中水面~水面以下 2.5m 区间采用如式(14)所定义的  $\sigma$  坐标进行 6 层分割,水面以下 2.5m~水面以下 20m 区间采用  $z$  直线坐标进行 9 层分隔,计算网格总数为

表 1 计算条件

| 项目      |           | 设定  |
|---------|-----------|---|
| 计算对象期间  |           | 2006/12/7 0:00-24:00  |
| 边 界 条 件 | 上游端流量     | 75 m <sup>3</sup> /s  |
|         | 上游端水温     | 如图 1 所示   |
|         | 上游端盐分     | 完全为淡水,设定为 0   |
|         | 下游端水位(潮位) | 如图 2 所示   |
| 初 始 条 件 | 下游端水温     | 18℃(缺乏时系列观测数据,采用水面日平均数据代替)                                      |
|         | 下游端盐分     | 如图 3 所示   |
|         | 水温        | 采用计算区间内 4 个观测点所测得的水温垂向分布及上下游边界条件进行线性内插                          |
|         | 盐分        | 采用计算区间内 2 个观测点所测得的盐分垂向分布及上下游边界条件进行线性内插                          |
| 支流流入取水量 |           | 2.0 m <sup>3</sup> /s (地点:右岸)<br>15.0 m <sup>3</sup> /s (地点:左岸) |
| 气象条件    |           | 气温,日辐射量,相对湿度,风速分别如图 4-7 所示;云量(=0.0~1.0)为 0.82                   |
| 河床糙率    |           | 0.030   |

50022 个(=(398-1)×(10-1)×(15-1))。具体计算条件如表 1 所示。坐标的定义是

$$\sigma = \frac{z - z_b}{H - z_b}$$

(14)

式中,  $z$  为直线坐标系的铅直坐标,  $z_b$  为下边界的

$z$  值,  $H$  为水位。

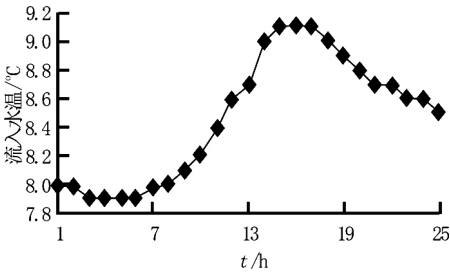


图 1 上游流入水温过程线

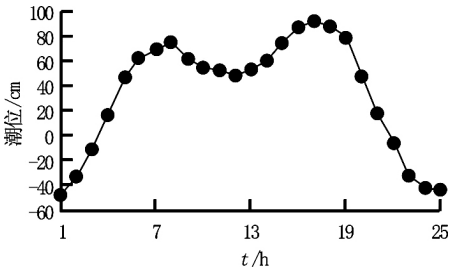


图 2 下游潮位过程线

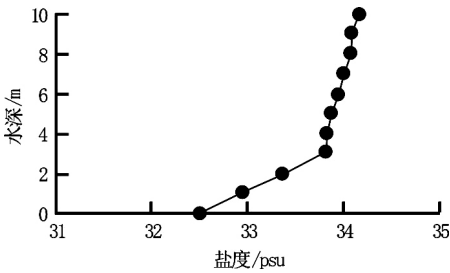


图 3 下游盐度分布

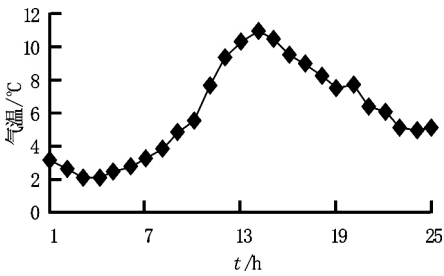


图 4 气温过程线

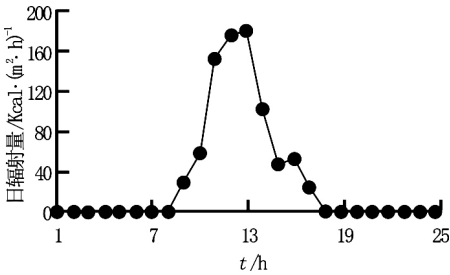


图 5 日射量过程线

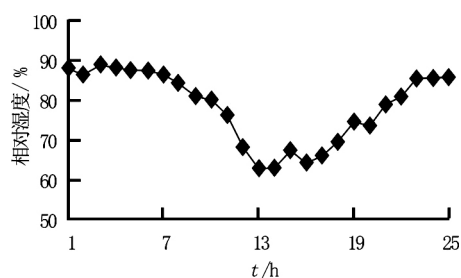


图6 相对湿度过程线

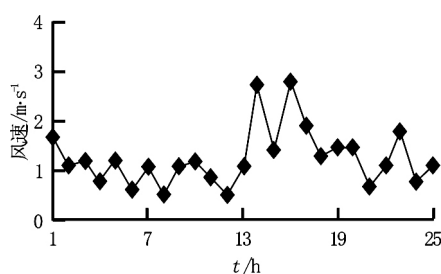


图7 风速过程线

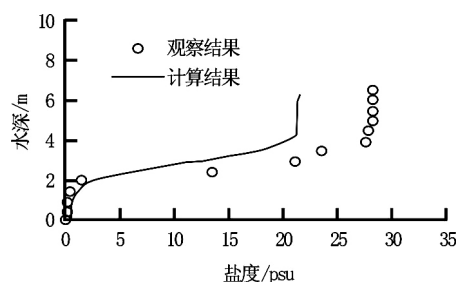


图9 A 观测点沿水深方向盐度计算值与实测值

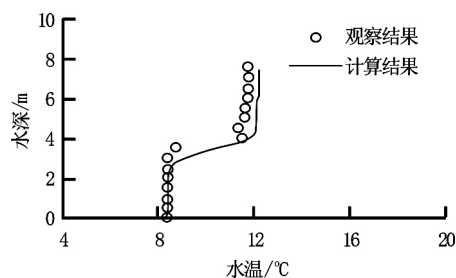


图10 B 观测点沿水深方向水温计算值与实测值

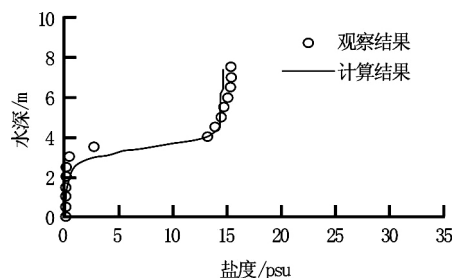


图11 B 观测点沿水深方向盐度计算值与实测值

计算区间内,有A、B两个观察站同时具有水温与盐度实测数据,A站点位于距河口8.5 km、离右岸约65 m处(该断面河宽约为156 m),B站点位于距河口10.0 km、离右岸约108 m处(该断面河宽约为143 m)。图8和图9显示了7日17:00(最高潮位之后2个小时),A观测点水温与盐度沿水深方向的计算值与实测值的比较结果;图10和图11则显示了同一时刻B点水温与盐度沿水深方向的计算值与实测值的比较结果。受篇幅制约,其它时刻的比较结果在此省略。

从图8可知,对于A观测点,计算水温在水深0~2 m范围内变化很小,仅从8.0°C升至9.0°C,即沿水深仅升温1°C左右;但在水深2~4.0 m范围内水温发生了急剧变化,从9.0°C升至13.5°C左右;而在水深4.0 m以下,水温的变化再度变得很小,沿水深方向仅从13.5°C升至13.9°C,变化不到0.5°C。与实测值相比,虽然计算水温在水深2 m以下比实测值略低1.5°C左右,但计算水温沿水深的这种变化趋势却与实测值十分一致。另一方面,从图9可知,计算盐度在水深1~2 m范围内很低,在

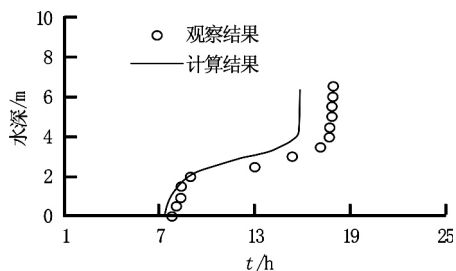


图8 A 观测点沿水深方向水温计算值与实测值

0.5~2.5 psu左右;而在水深2~4.0 m范围内,盐度变化很大,从2.5 psu变至20.5 psu左右;最后,在水深4.0 m以下,盐度很高,由20.5 psu升至21.5 psu左右。与实测值相比,虽然计算盐度在水深2 m以下比实测值小6.5 psu左右,但计算盐度沿水深的这种变化趋势却与实测值十分一致。对比图8与图9可知,在水深0~2 m范围内,水的盐度很低,可见该区域的水主要来自于上游河水,其水温主要受控于上游的流入水温,故该区域的水温与上游流入水温接近;而在水深2 m~4 m范围内,盐度变化很大,可见该区域为上游来水(淡水)与河口盐水入侵相互作用的界面,其水温同时受上游流入水温与入侵海水水温的影响;而在4 m以下,主要受控于海水入侵。

对于B观测点,从图10~11可知,计算水温与盐度沿水深的变化趋势与实测值十分一致。总体而言,B点的水温与盐度沿水深变化趋势与A点的相似。但由于B点在A点的上游1.5 km处,盐水入侵的影响较下游A点弱,因此该点水深4 m以下的

盐度与温度均比 A 点的小。

上述结果表明,模拟结果所呈现出的水温与盐度沿水深方向分层分布情况,以及越往上游其上下层温差与盐度差越小等现象,都与实测值十分相符。

## 4 结 论

(1)感潮河段受到密度流的影响,而水体密度不仅受盐度影响而且还受温度影响。本文模型通过同时考虑温度与盐度场,克服了仅考虑盐度场的一般模型的不足之处,从而更适用于感潮河段的盐水入侵计算。

(2)模型的验证计算结果表明,本文所提出的温度与盐度场数学模型能较好地模拟出盐水入侵及温度垂向分层现象,具有较好的计算精度,可应用于感潮河段盐水入侵的预测。

(3)本文模型今后有望应用于感潮河段的温排水计算。为此需开展温排水条件下的模型验证计算。

## 参 考 文 献:

- [1] 马钢峰,刘曙光,戚定满. 长江口盐水入侵数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2006, 21(1): 54-61.  
MA Gang-feng, LIU Shu-guang, QI Ding-man. Three dimensional hydrodynamic model of Yangtze Estuary[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A, 2006, 21(1): 54-61.
- [2] 姜恒志,沈永明,汪守东. 瓯江口三维潮流和盐度数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2009, 24(1): 63-70.  
JIANG Heng-zhi, SHEN Yong-ming, WANG Shou-dong. Numerical simulation study on three-dimensional tidal flow and salinity in the Oujiang Estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2009, 24(1): 63-70.
- [3] JIANG H Z, SHEN Y M. Numerical study on salinity stratification in the OUJIANG river estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(6): 835-842.
- [4] 汪一航,魏泽勋,王永刚,等. 潮汐潮流三维数值模拟在庄河电厂温排水问题中的应用[J]. 海洋通报, 2006, 25(1): 8-15.  
WANG Yi-hang, WEI Ze-xun, WANG Yong-gang, et al. Application of tidal numerical model to thermal plume dispersion from power plant at Zhuanghe[J]. Marine Science Bulletin, 2006, 25(1): 8-15.
- [5] 张细兵,金 琨,林木松. 潮流河段温排水影响的平面二维数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(3): 13-16.  
ZHANG Xi-bing, JIN Kun, LIN Mu-song. 2D numerical simulation for warm water drainage in tide river reach[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(3): 13-16.
- [6] 杨芳丽,谢作涛,张小峰,等. 非正交曲线坐标系平面二维电厂温排水模拟[J]. 水利水运工程学报, 2005 (2): 80-85.  
YANG Fang-li, XIE Zuo-tao, ZHANG Xiao-feng, et al. Simulation of 2-D cooling water in non-orthogonal curvilinear coordinate[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005 (2): 80-85.
- [7] ROUSE H. Advanced mechanics of fluids (appendix) [M]. New York: John Wiley and Sons Publishing Co., Inc., 1959, 407-423.
- [8] FOFONOFF N P. Physical properties of sea water, in the sea[M]. New York: Interscience, 1962, 1: 3-30.
- [9] 陈永灿,张宝旭,李玉梁. 密云水库垂向水温模型研究[J]. 水利学报, 1998 (9): 14-20.  
CHEN Yong-can, ZHANG Bao-xu, LI Yu-liang. Study on model for vertical distribution of water temperature in Miyun Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998 (9): 14-20.
- [10] 近森邦英, 紙井泰典. ダム湖の水質と流動に' 関する研究(2)-温躍層付近の水温変動[R]. 高知大学学術研究報告(自然科学), 1986, 35: 1-22.  
CHIKAMORI K, YASUNORI K. Studies on the water quality and flow in reservoirs(2)—Water temperature variation along thermocline[R]. Research Reports of The Kochi University (Natural Science), 1986, 35:1-22.
- [11] PATANKAR S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. Washington D C: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- [12] ZHU M-L, SHIMIZU Y, NISHIMOTO N. Calculation of curved open channel flow using physical curvilinear non-orthogonal coordinates [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 44 (1): 55-70.